

# **Recherches-système en agriculture et développement rural**

**Symposium international**

Montpellier, France – 21-25 novembre 1994

## ***Systems-Oriented Research in Agriculture and Rural Development***

***International Symposium***

Montpellier, France – 21 to 25 November 1994

**Communications / Papers**



# L'eau et l'activité agricole : diagnostic et modélisation du fonctionnement de quelques hydrosystèmes agricoles tropicaux

Affholder François<sup>1</sup> ; Reyniers François-Noël<sup>2</sup> ; Scopel Eric<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Unité de recherche gestion de l'eau, CIRAD-CA, délégation CIRAD, SHIS Q 11 Cj.6, C. 7, 71 625 260, Brasília, Brésil

<sup>2</sup> Unité de recherche gestion de l'eau, CIRAD-CA, BP 5035, Montpellier, France

<sup>3</sup> Unité de recherche gestion de l'eau, CIRAD-CA, CIMMYT A.P. 6 641, 06 600 Mexico D.F., Mexique

## Résumé

*Cette communication illustre comment la quantification des flux hydriques dans l'écosystème agricole permet de mieux comprendre les relations entre l'eau et l'activité agricole. L'objet d'étude est l'hydrosystème agricole, ensemble des composantes économiques et sociales, techniques, biologiques et physiques de l'écosystème agricole qui déterminent les flux hydriques. La méthode d'étude appliquée par les auteurs aux composantes biophysiques et techniques de ce système est une démarche empirique dans laquelle on fait converger progressivement avec la réalité l'image virtuelle fournie par un modèle. Les résultats obtenus au Brésil, au Mexique et au Sénégal indiquent les facteurs de productivité et de durabilité de ces hydrosystèmes agricoles et l'impact de nouvelles contraintes ou techniques. Les avantages de cette approche et les lacunes du niveau socioéconomique sont discutés dans la perspective d'élaborer des outils d'aide à la décision des agriculteurs et de négociation entre acteurs du développement.*

## Mots clés

*Hydrosystème, bilan hydrique, zonage, diagnostic agronomique, maïs, mil, riz, Brésil, Mexique, Sénégal.*

## Abstract

**Water and agricultural activity: description and modeling of certain tropical agricultural water systems.** Quantification of water in the agricultural ecosystem allows a better understanding of the relationship between water and agricultural activities. The term 'agricultural water system' refers to the subsystem that encompasses all the socioeconomic, technical, biological, and physical components of the agricultural ecosystem and their interactions that determine water flux in agriculture. The empirical approach adopted in this study aims at a convergence of virtual images produced by modeling and reality. Results obtained in Brazil, Mexico, and Senegal indicate the relevance of this approach to analyses of the productivity and sustainability of tropical agricultural

*water systems and to evaluations of the impact of new techniques and constraints. Lack of socioeconomic data still remains a major constraint. Nevertheless, this approach offers definite advantages as an aid to decision making by farmers and negotiation between development agents.*

## Introduction

Dans les relations entre activité agricole et environnement, l'eau occupe une place majeure, à la fois comme facteur de production et comme facteur d'évolution du milieu, spécialement lorsqu'elle est insuffisante et aléatoire (Le Houérou, 1992).

Sur les interfluvies, l'eau est soumise à une gestion complexe impliquant de nombreux acteurs, dont les agriculteurs sont les principaux. Sont aussi concernés les responsables des performances et de la durabilité des systèmes agricoles et ceux de la quantité et qualité de la ressource hydrique en aval, dans les nappes, les cours d'eau et les lacs.

Cet article propose le concept d'hydrosystème agricole ainsi qu'une démarche et des outils pour analyser les aspects biophysiques et techniques de cette gestion, en déceler les inconvénients et proposer des améliorations durables.

## Méthodes et outils d'étude des hydrosystèmes agricoles

### Flux hydriques et hydrosystème agricole

La ressource en eau qui nous intéresse ici est celle du système élémentaire sol-culture, échangée avec l'extérieur à travers les flux suivants (figure 1) :

- les précipitations et les irrigations éventuelles ;
- l'évaporation vers l'atmosphère ;

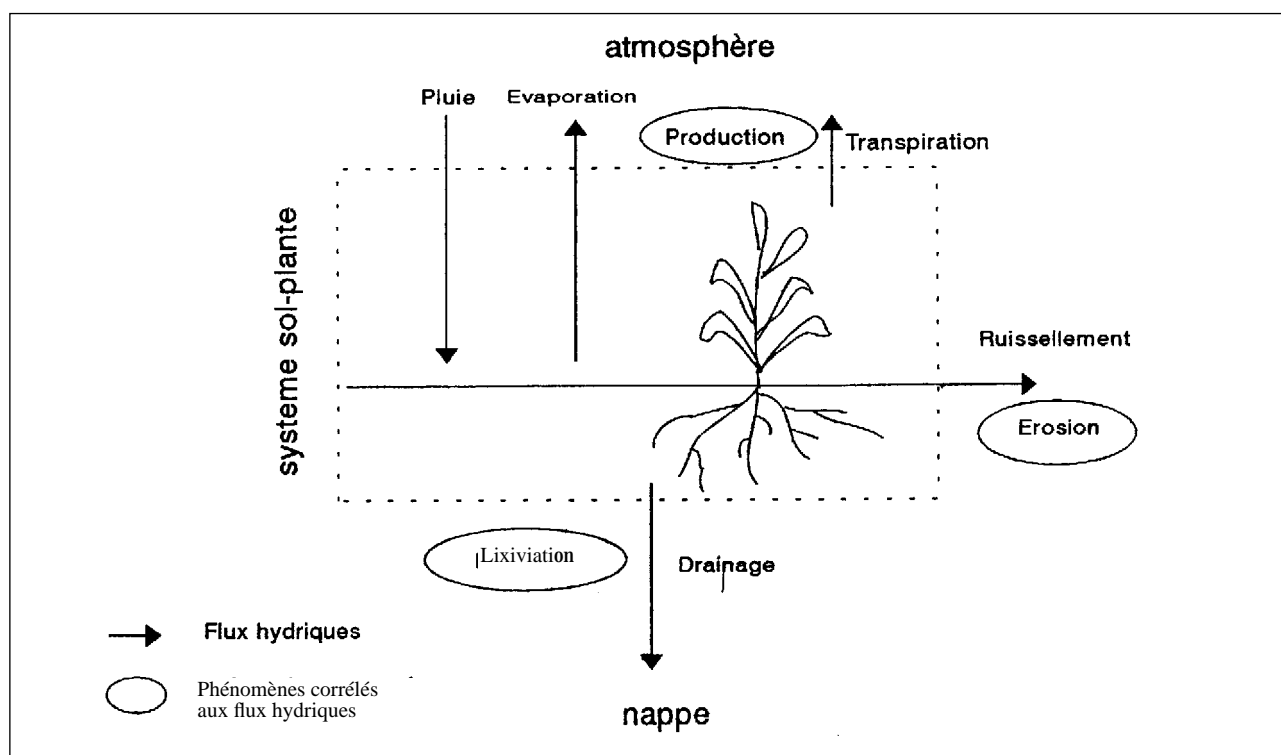


Figure 1. Schéma des flux hydriques de la productivité et de la durabilité dans l'hydrosystème agricole.

- le ruissellement à la surface du sol. Il a souvent un pouvoir érosif et peut entraîner ou apporter des éléments chimiques en solution (perte de fertilité, pollution, etc.). Il peut aussi permettre de concentrer la ressource en eau à certains endroits ;
- le drainage sous la zone de sol colonisée par les racines. Il peut modifier favorablement ou défavorablement l'équilibre ionique des sols et leur aération et approvisionner la nappe phréatique ;
- les remontées capillaires provenant de la nappe. Elles peuvent contribuer à l'approvisionnement des cultures mais aussi induire une asphyxie des racines en cas d'hydromorphie ;
- la transpiration, enfin. Elle régule la photosynthèse des végétaux et conditionne la production de biomasse, surtout dans les milieux où la contrainte hydrique l'emporte sur les contraintes liées au rayonnement ou à la température.

Nous proposons de nommer hydrosystème agricole le sous-ensemble de l'écosystème agricole comprenant tous les éléments de l'écosystème, facteurs et relations entre facteurs, qui participent au déterminisme de ces flux hydriques. Il peut être appréhendé à diverses échelles de temps et d'espace (Reyniers, 1994).

### Composantes de l'hydrosystème agricole

La chaîne de relations permettant d'agir sur les flux hydriques peut servir de base pour décomposer l'hydrosystème agricole (figure 2). Le premier niveau est celui du milieu physique : les flux hydriques sont directement déterminés par l'état du sol, du peuplement végétal et du climat. Le niveau intermédiaire est celui des techniques agricoles (Sebillotte, 1978) : il comprend les actions que les agriculteurs et les aménageurs de l'espace exercent sur le milieu

pour en modifier l'état. Enfin, le niveau supérieur est le niveau social et économique : il est constitué des éléments structurels des exploitations agricoles, des circonstances telles que les prix relatifs des entrées et sorties, du savoir et des projets sociaux des divers acteurs, qui déterminent leurs actes techniques.

La problématique initiale détermine les niveaux et les échelles d'analyse à privilégier. Mais généralement, la connaissance d'une partie du système suscite de nouvelles questions conduisant à intégrer d'autres éléments du système, réaliser des changements d'échelle et collaborer avec de nouvelles disciplines.

### Démarche et outils d'analyse

L'approche proposée est une démarche itérative de diagnostic et de modélisation. Au départ, l'hydrosystème agricole est représenté par un modèle simple postulant que la production de biomasse est au potentiel permis par le rayonnement. En zone tropicale, le premier diagnostic conduit généralement à constater que la productivité réelle est nettement inférieure à ce potentiel.

Une deuxième itération est alors réalisée. On introduit l'effet de la contrainte hydrique dans le modèle, mais en considérant, à ce stade, que seules les précipitations limitent la valorisation de l'énergie radiative. On affine alors le diagnostic en comparant les valeurs des flux hydriques et de la productivité simulés par le nouveau modèle avec leurs valeurs mesurées lors d'une enquête. Puis on recherche des corrélations entre les écarts observés et un ensemble de variables susceptibles de limiter l'utilisation de la ressource pluviométrique. Ces variables, par exemple la fertilité du sol ou sa sensibilité au ruissellement, seront

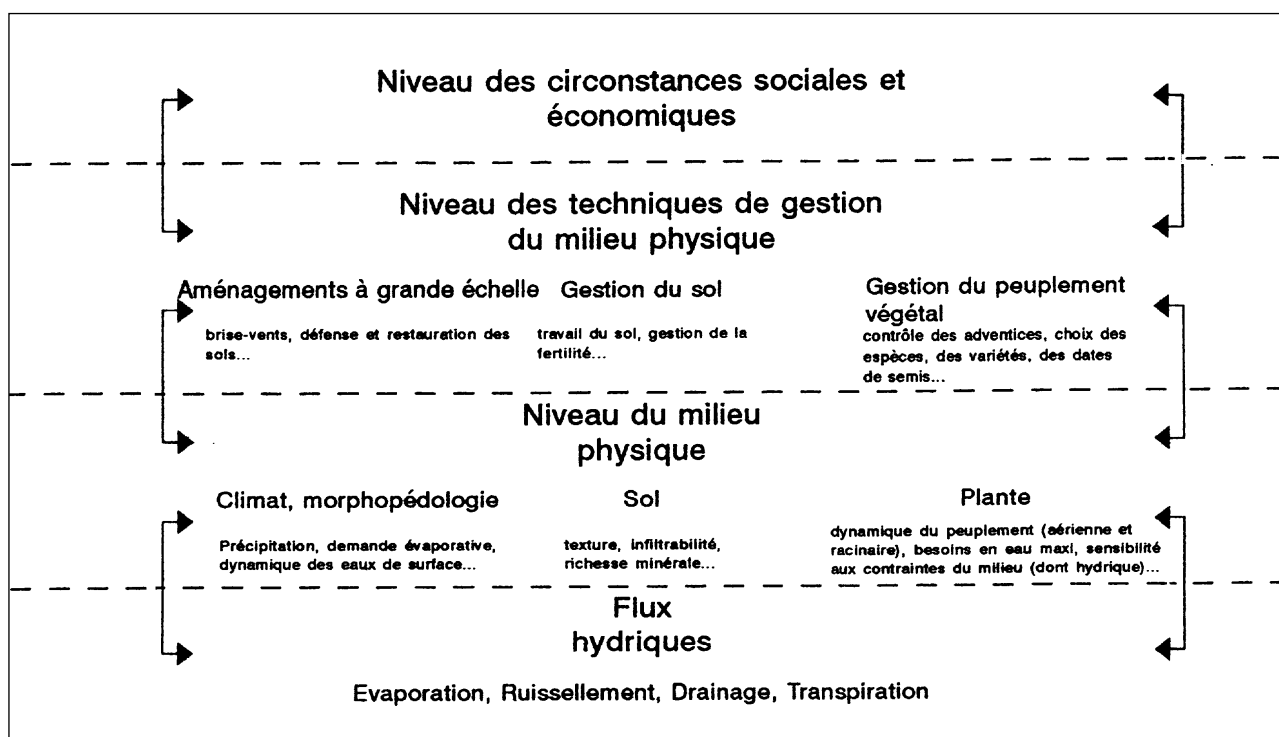


Figure 2. Schéma des composantes de l'hydrosystème : flux d'information.

à prendre en compte au cours de l'étape de modélisation ultérieure.

Ainsi, les variables des divers niveaux et relations entre variables sont intégrées dans le modèle dans l'ordre décroissant de leur poids relatif dans le déterminisme de l'hydrosystème agricole.

A l'issue du processus, on dispose d'un modèle de fonctionnement de l'hydrosystème local dont la précision dépend du nombre d'itérations effectuées et des approximations faites au cours des étapes de modélisation.

Le modèle de bilan hydrique utilisé à partir de la deuxième itération a été mis au point initialement par Forest (1984). Fondé sur l'analogie sol-réservoir, il a fait la preuve de sa capacité à s'enrichir de nouvelles fonctions pour s'adapter aux diverses situations étudiées et intégrer les facteurs identifiés lors des phases de diagnostic successives (Fréteaud *et al.*, 1987 ; Poss, 1991 ; Albergel *et al.*, 1991).

De même, le modèle de production couplé au modèle de bilan hydrique est très simple : le rayonnement reçu par la culture permettant de calculer la production potentielle de biomasse est déduit de la demande évaporative variable d'entrée du modèle de bilan hydrique. Ce dernier fournit un indice de déficit hydrique résultant de l'utilisation de la ressource pluviométrique. La production potentielle est modulée par cet indice en tenant compte des variations de sensibilité de la culture en fonction de la phase du cycle et des différents organes (Reyniers, 1994 ; Cortier, 1994).

## Applications

### Cas des *cerrados* brésiliens

Dans les *cerrados* du Brésil, les cultures de riz pluvial, maïs, soja progressent rapidement, en rotation avec la sole fourragère. Cette région immense, de deux cents millions

d'hectares, qui couvre la majeure partie du plateau central a une pluviométrie annuelle de 1 200 à 1 800 mm et une demande évaporative de 4 à 6 mm/jour, liée à un rayonnement élevé.

Les potentialités de production de cette région, encore mal connues, ont été estimées sur l'exemple du riz pluvial, en simulant le bilan hydrique moyen d'au moins 15 années sur 80 stations pluviométriques. On a pu constater que, dans le cas où les seuls facteurs limitants sont le rayonnement et la pluviométrie, les besoins en eau du riz sont généralement satisfaits, à l'exception de la bordure est de la région, où ils sont restreints, ne permettant des productivités moyennes que de 2 t/ha (figure 3a) (Steinmetz *et al.*, 1988).

Or, en réalité, dans la majeure partie de la région, les cultures paraissent sensibles à des périodes de quelques jours sans pluie, appelées *véranicos*, qui surviennent fréquemment au milieu de la saison humide lorsque les plantes sont à leur phase reproductive. Des observations de terrain, constituant une étape de diagnostic, ont montré qu'en fait l'enracinement des cultures reste très superficiel, du fait de l'aluminium toxique amené par l'acidification du sol (Reyniers *et al.*, 1987) et de la compaction du sol par des engins agricoles mal adaptés.

A l'étape suivante de modélisation, on a introduit l'effet de l'enracinement sur le bilan hydrique du riz. Lorsque l'enracinement est réduit conformément à la réalité, la simulation prévoit bien un risque élevé de déficit d'alimentation hydrique (tableau I). La simulation permet alors d'extrapoler à l'ensemble du Brésil où se pratique cette culture l'effet combiné du climat et des contraintes de réserve utile des sols, en particulier son acidité, sur les potentialités de production (figure 3b). La comparaison des deux cartes permet d'évaluer la marge de progrès théorique en termes de production justifiée par l'amélioration de la réserve utile. Le modèle prévoit de plus l'augmentation des excès d'eau, drai-

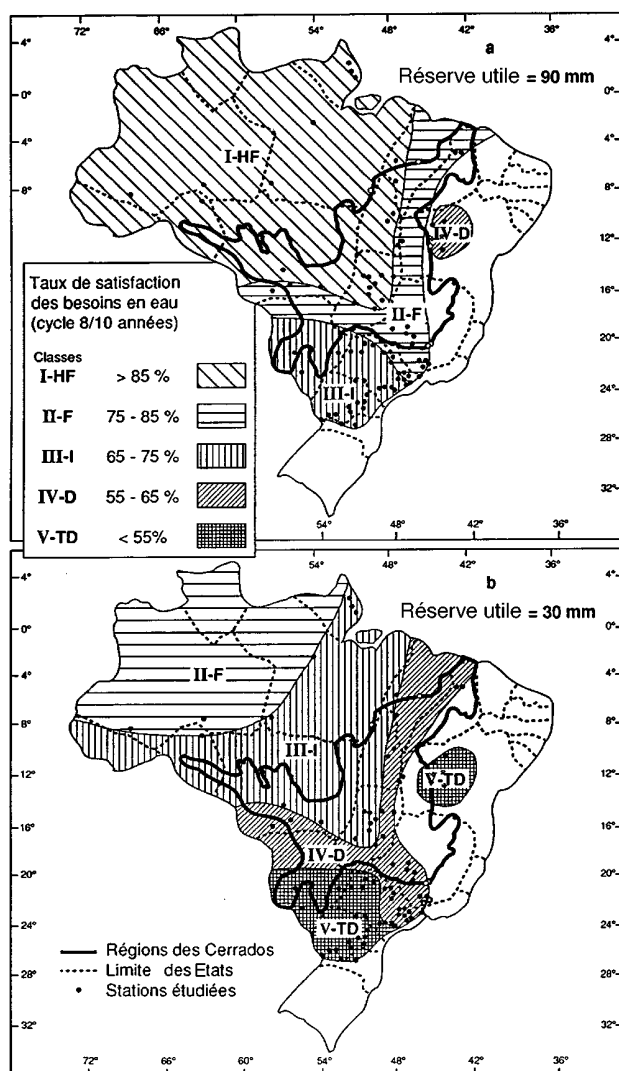


Figure 3. Zonage des taux de satisfaction des besoins en eau du riz dans les cerrados brésiliens. a) simulation avec rayonnement et ressource pluviométrique comme seuls facteurs limitants ; b) simulation avec, en plus, colonisation des racines insuffisante ; H-F : hautement favorable ; F : favorable ; I : intermédiaire ; D : défavorable ; TD : très défavorable.

nage et ruissellement, susceptibles d'entraîner une lixiviation et une érosion importantes.

Cette étude à l'échelle régionale a permis de prévoir que l'irrigation dans le but de limiter les effets des *veranicos*, bien que pratiquée par de nombreux agriculteurs et encouragée par l'agro-industrie, augmente les risques de dégradation du milieu et n'est donc pas une solution durable. Une gestion adéquate de l'hydrosystème agricole des *cerrados* passe en revanche par une augmentation de la zone accessible aux racines. Les succès des pratiques fondées sur les amendements correcteurs de l'acidité et les techniques évitant la compaction du sol et stimulant l'activité biologique en profondeur ont par la suite montré le bien-fondé de ce principe (Seguy *et al.*, 1989).

Ainsi, la démarche itérative modélisation - diagnostic de l'hydrosystème agricole a contribué à définir des itinéraires techniques adaptés à l'exploitation agricole des caractéristiques pédoclimatiques des *cerrados*.

### Cas des plateaux mexicains du Jalisco

Sur les plateaux à pluviométrie irrégulière de la côte Pacifique de l'État de Jalisco, au Mexique, la technique du semis direct sur paillis de résidus a été proposée pour sécuriser la production de maïs. Toutefois, avant d'envisager sa diffusion, il paraissait nécessaire d'évaluer ses performances dans les conditions de culture variées de la zone.

En premier lieu, les modifications possibles de l'hydrosystème sous l'action de techniques de préparation du sol ont été inventoriées et replacées dans un schéma théorique général (figure 4).

Par la suite, ces modifications des flux hydriques et de l'évolution de la réserve d'eau utilisable ont été étudiées dans un dispositif contrôlé pour trois techniques de préparation particulières : le semis direct avec 2 t/ha de résidus en surface (SD) ; le semis direct sans protection en surface (SO) ; la préparation superficielle aux disques (DM). Le modèle de bilan hydrique a alors été paramétré pour rendre compte des effets de chaque préparation (figure 5).

Une enquête a été réalisée sur un réseau de parcelles couvrant la plus large part possible de variabilité des conditions régionales de culture. Les trois techniques de préparation

Tableau I. Effet de la réserve utile sur les taux de satisfaction des besoins en eau du riz et sur l'excès d'eau de stations représentatives des cerrados et du sud du Brésil.

Station-Etat	90 mm de réserve utile		30 mm de réserve utile	
	Taux de satisfaction en eau du cycle, 8 à 10 ans en %	Excès d'eau du cycle (mm)	Taux de satisfaction en eau du cycle, 8 à 10 ans en %	Excès d'eau du cycle (mm)
Porto Velho-Rox	94	684	82	780
Imperatriz-Ma	88	405	66	531
Teresina-Pi	87	495	66	612
Barreiras-Ba	54	207	39	342
Parana-To	67	261	77	432
Taguatinga-Go	85	513	62	669
Goiania-Go	83	387	65	513
Cuiaba-Mt	80	387	61	507
Ponta Pora-Ms	72	234	50	408
Tapirai-Mg	58	415	54	702
Terra Roxa-Sp	83	396	59	525
Ponta Grossa-Pr	79	207	54	318

Simulation de l'ETR/ETM cycle et de l'excès d'eau (ruissellement plus drainage) réalisée sur un minimum de 15 ans de pluviométrie, avec un cycle de 110 jours et une date de semis optimale.



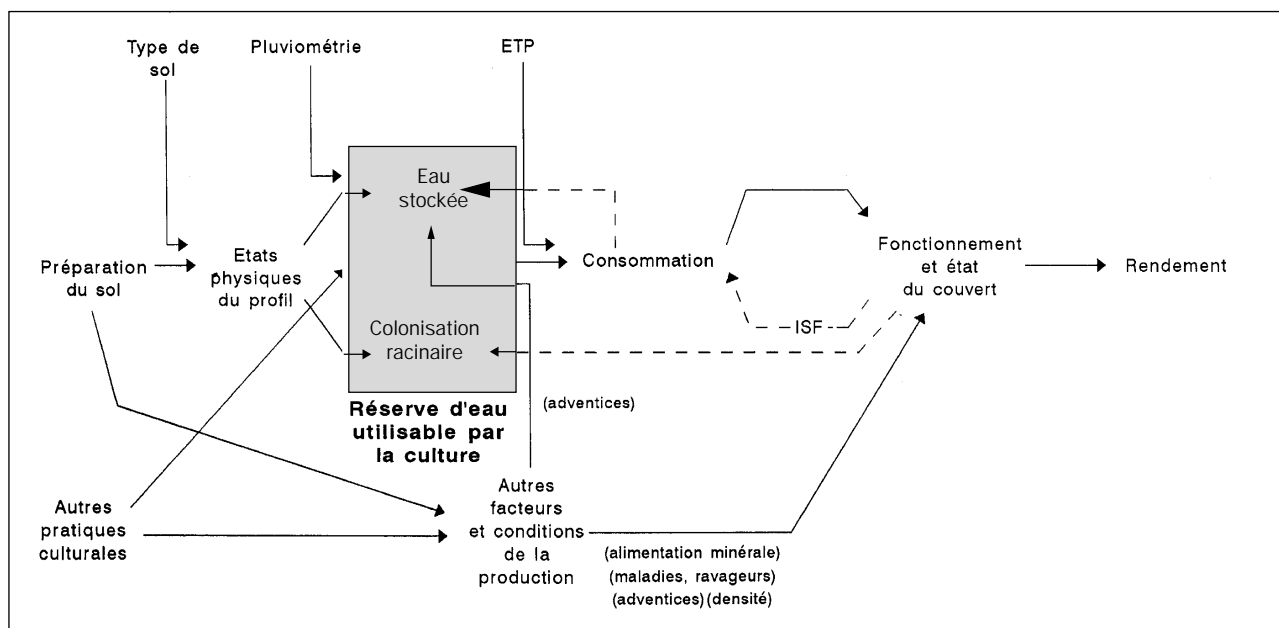


Figure 4. Modèle théorique des modifications de l'hydrosystème par les techniques de préparation du sol. Cas des plateaux de moyenne altitude du Jalisco au Mexique.

ISF = indice de surface foliaire ; ETP = évapotranspiration potentielle.

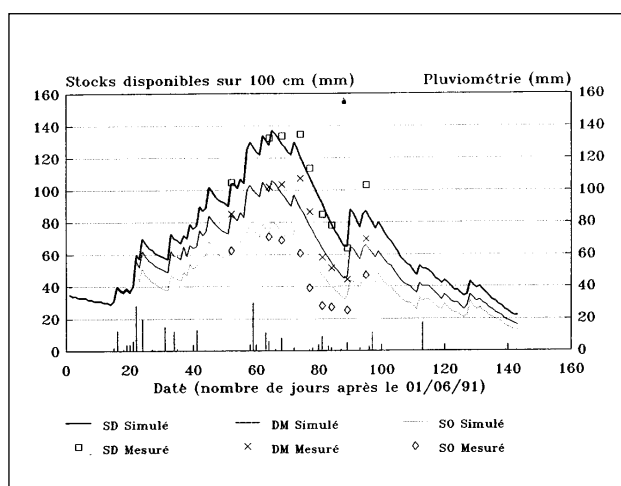


Figure 5. Simulations de l'effet des techniques de préparation sur le stock hydrique disponible d'un sol des plateaux du Jalisco, Mexique.

SD : semis direct avec résidus pailleux ; SO : semis direct sans protection ; DM : travail superficiel aux disques

du sol ont été établies dans chaque parcelle ; leur conduite était ensuite gérée librement par le producteur, mais de façon comparable dans les trois traitements.

Les variables obtenues par enquête ou simulation ont été étudiées par analyse factorielle des correspondances multiples. Le rendement a été introduit comme variable supplémentaire à expliquer. Les axes du plan principal structurent bien la variabilité de l'échantillon : l'axe 1 est défini par la satisfaction des besoins en eau de la culture ; l'axe 2, par certaines conditions de culture (pression de l'enherbement, dispersion du peuplement, pauvreté minérale). De la représentation des individus sur ce plan (figure 6), cinq groupes se dégagent en fonction des niveaux de rendement atteints. On en déduit les constatations suivantes :

- toutes les parcelles fortement enherbées ont présenté de mauvais rendements (groupe 5) quels que soient les ni-

veaux d'alimentation hydrique, même si les autres conditions sont favorables (cas des individus isolés et reliés par une flèche au groupe 5 de la figure 6). Un fort enherbement semble être le facteur prépondérant dans ces conditions ;

- pour les autres parcelles peu enherbées, le principal facteur de différenciation des rendements est l'alimentation hydrique. Les groupes 1 à 4 sont en effet placés suivant le gradient de satisfaction des besoins en eau. On note que le semis direct favorise l'alimentation hydrique si la ressource pluviométrique diminue, car la proportion d'individus SD s'accroît du groupe 1 aux groupes 3 et 4 ;
- la réponse aux autres conditions de culture, et notamment d'alimentation minérale, varie selon le niveau d'alimentation hydrique. S'il est déficient, la réponse sera faible (groupes 1 et 2 très verticaux, se différenciant selon l'axe 1) ; s'il est satisfaisant, la réponse sera forte (groupes 3 et 4 se différenciant plus selon l'axe 2).

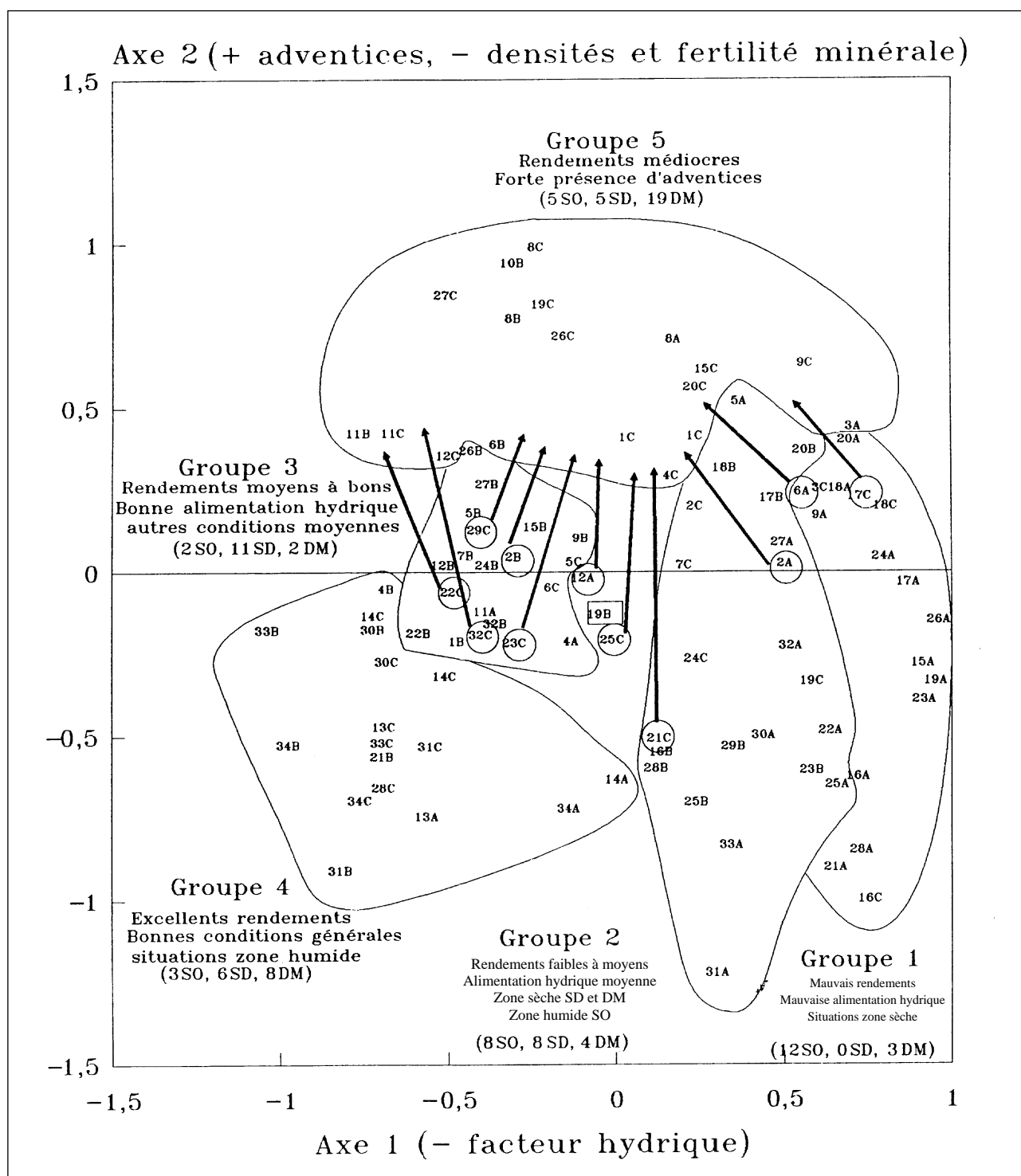
Ainsi, l'alimentation hydrique du maïs pluvial peut être améliorée par le semis direct avec résidus, mais cela ne se traduit sur la production que lorsque la maîtrise des autres conditions de culture atteint un niveau suffisant.

En conclusion, la démarche modélisation-diagnostic appliquée à la culture du maïs met en évidence que le semis direct ne peut être généralisé à l'ensemble des plateaux mexicains qu'à condition d'utiliser herbicides et fertilisants, compte tenu des aléas pluviométriques.

### Cas du bassin arachidier du Sénégal

Comparables aux recherches présentées sur le Brésil, les potentialités agroclimatiques de la culture du mil ont été évaluées dans le bassin arachidier du Sénégal en simulant la productivité d'une culture théorique de référence, pour laquelle les seuls facteurs limitants seraient le rayonnement, la pluviométrie et la réserve utile des sols (Forest, 1993).

Suivant la démarche préconisée, une enquête agronomique en parcelles agricoles est réalisée dans cinq villages



**Figure 6.** Facteurs explicatifs des rendements selon les modes de préparation du sol sur les plateaux du Jalisco. Individus regroupés par niveau de rendement, sur le plan principal de l'analyse factorielle des correspondances multiples (nombre d'individus pour chaque mode de préparation du sol); a = SO : semis direct sans protection; b = SD : semis direct avec résidus pailleux; c = DM : travail superficiel aux disques.

pendant trois ans. Pour la grande majorité des situations étudiées, le rendement réel est très inférieur à ce potentiel agroclimatique (figure 7). L'écart est d'autant plus grand que le potentiel est élevé : plus la ressource hydrique est abondante, moins elle est valorisée. Une analyse plus poussée (Affholder, 1994) montre que les causes de l'écart sont les dégâts causés par les déprédateurs, les variables descriptives de la fertilité et de la qualité du contrôle de l'en-

herbement, enfin, l'état de surface, facteur de ruissellement.

Actuellement, les travaux portent sur l'introduction de ces facteurs dans le modèle. Dans le cas de la fertilité, l'interaction avec l'alimentation hydrique a des conséquences importantes. Un développement végétatif entraîne une transpiration élevée et favorise, en années sèches, un épuisement précoce des réserves en eau du sol pendant la for-

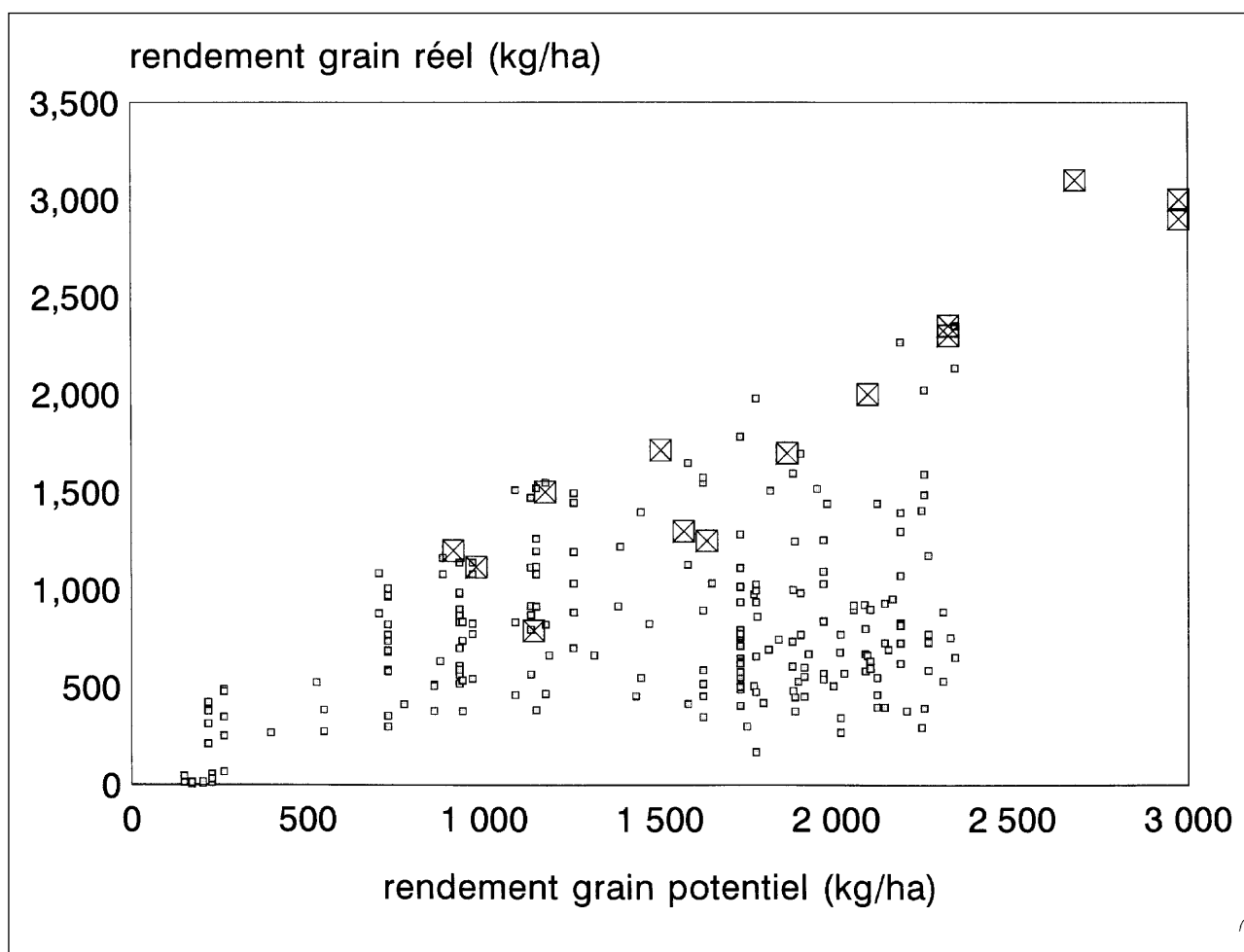


Figure 7. Variabilité de la valorisation des précipitations par le mil au Sénégal. Comparaison entre rendements réels et potentiels simulés en fonction du rayonnement, de la pluviométrie, et de la réserve utile.

(□) parcelles paysannes de cinq villages du bassin arachidier, de 1989 à 1991

(⊠) parcelles de station, conduites en vue d'obtenir le potentiel

mation et le remplissage des grains (Affholder, 1994). Une fertilité excessive accroît donc la probabilité que les besoins en eau de la culture excèdent l'offre pluviométrique. Quantifier cette interaction pour estimer cette probabilité est essentiel pour comprendre les stratégies de gestion de la fertilité des agriculteurs et éventuellement les optimiser. Pour cela, une manière simple est de représenter la fertilité du sol par la biomasse qui serait produite si l'eau n'était pas limitante, puis d'introduire l'effet d'un stress hydrique sur la production. On peut alors simuler, pour un potentiel de production donné, l'effet de la variabilité interannuelle des précipitations sur le rendement, et ce à partir de séries pluviométriques de l'ordre de vingt années.

La productivité en eau non limitante d'une parcelle paysanne de brousse, c'est-à-dire en rotation continue mil-arachide pratiquement sans restitution, est voisine de 1 500 kg/ha de grains de mil à Louga (nord du bassin arachidier) et serait proche de 1 800 kg/ha, du fait de sols sensiblement plus argileux à Nioro (200 km plus au sud). Une fertilisation en vue d'augmenter ce potentiel d'un peu plus de 60 % (pour atteindre respectivement 2 500 et 3 000 kg/ha) aboutit à un gain effectif à Nioro, quelle que soit l'année, mais seulement une année sur deux à Louga (figure 8). Cependant, en cas de ruissellement simulé selon la méthode proposée par

Albergel *et al.* (1991), le risque lié à la fertilisation à Nioro devient équivalent à celui de Louga.

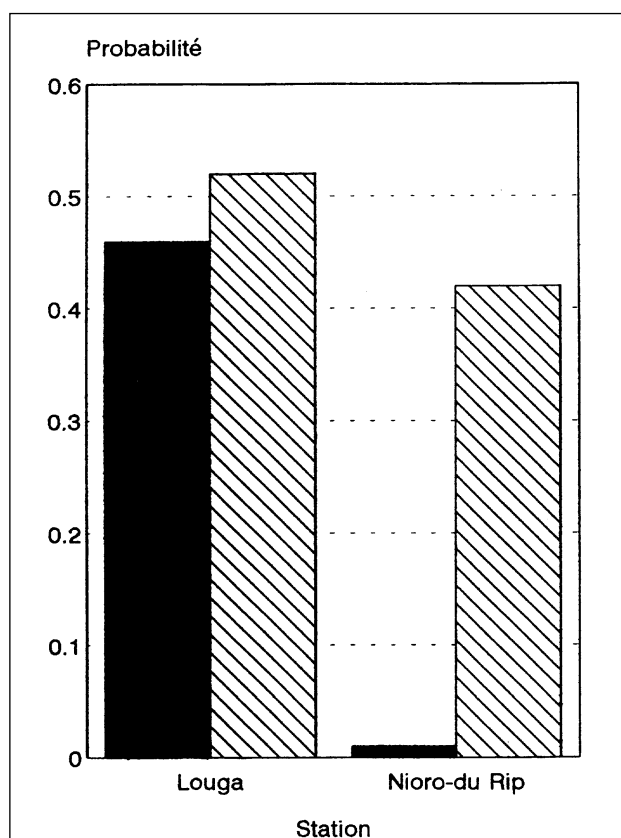
Il en résulte que la lutte contre la dégradation des sols liée à la culture continue sans restitution et *a fortiori* l'intensification agricole ne peuvent être prises en charge par les agriculteurs du Sénégal qu'à condition de réduire les risques résultant de l'interaction entre fertilisation et alimentation hydrique. Au sud du pays, on peut jouer sur l'offre en eau si on parvient à limiter le ruissellement, mais au nord, on ne peut guère envisager d'autre solution qu'une politique économique visant à faire prendre à l'État une partie des risques, notamment en jouant sur les prix relatifs des intrants et des produits.

## Discussion et conclusion

Pour certains systèmes de production tropicaux, les exemples précédents illustrent comment la quantification des flux hydriques permet de déterminer :

- la part des facteurs climatiques dans la variabilité de la production du système étudié ;





**Figure 8.** Risques d'une réponse nulle à la fertilisation du mil Souna selon deux régimes pluviométriques au Sénégal.

Probabilités sur la période 1972 à 1992 d'absence de gain de production avec une fertilisation augmentant de 60 % le rendement sans engrais si eau non limitante.

(■) : sans ruissellement

(//) : 30 % des pluies ruisselées

- les écarts existant entre les productivités réelles de ce système et le potentiel résultant des conditions pédoclimatiques du lieu ;
- les causes de ces écarts ;
- l'aptitude du système étudié à se maintenir durablement ;
- l'impact potentiel d'un changement technique sur la productivité et la durabilité du système étudié.

On notera cependant que, les auteurs ayant peu de connaissances en sciences humaines, la plupart des études réalisées ont privilégié les niveaux d'analyse physique et technique. Il est clair que, pour améliorer les diagnostics du fonctionnement des hydrosystèmes agricoles, il serait souhaitable de coupler les modèles présentés à des modèles socioéconomiques. La démarche proposée peut favoriser l'intégration pluridisciplinaire nécessaire à un tel couplage et éviter le défaut que serait une juxtaposition des méthodes et outils de chaque discipline.

Enfin, pour être vraiment utile à la gestion du milieu rural, la connaissance de l'hydrosystème agricole ne doit pas rester celle des chercheurs. De ce point de vue, sa capitalisation sous forme de modèles pourrait être considérée comme un handicap. Nous pensons au contraire que cela constitue un atout, en partie à cause du type de modèles employés. En effet, ces modèles se distinguent des modèles mécanistes par une forte proportion de relations empiriques et sont, de ce fait, peu exigeants en paramètres d'entrée.

S'ils ne permettent guère d'extrapolation en dehors des régions où ils ont été calibrés et validés, une fois ces opérations relativement simples réalisées, ils s'avèrent précis et faciles d'emploi. Il est donc concevable que ces modèles servent de base à des outils :

- l'aide à la décision des agriculteurs, en leur permettant de connaître leur marge de progrès (écart entre production réelle et potentielle) et d'évaluer le bien-fondé à plus ou moins long terme de divers choix techniques (ceux qu'ils pratiquent ou de nouveaux) ;
- de négociation entre les différents groupes d'acteurs concernés par la gestion des ressources naturelles, en évaluant l'impact, sur l'hydrosystème dans son ensemble et pour chacun des groupes, d'une pratique nouvelle revendiquée par un de ces groupes. Cette démarche rejoint le concept de recherche-action tel qu'il a été appliqué par Chia *et al.* (1992).

On notera que, dans ces applications, le modèle représente la perception de la réalité qu'ont les chercheurs, qui l'ont mis au point à partir d'observations partielles. La confrontation de cette perception à celle qu'ont les agriculteurs ou d'autres acteurs concernés par le monde rural nous paraît en elle-même une méthode de diagnostic et d'extrapolation.

## Remerciements

Les auteurs remercient Mme Christine Baudouin de ses suggestions de correction et M. Jean-Claude Lorente de la cartographie.

## Références bibliographiques

- Affholder F., 1994. Influence de la fertilisation et du contrôle de l'enherbement sur la réponse des rendements du mil pluvial à un indice hydrique synthétique. In : *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale*, F.-N. Reyniers et L. Netoyo éd., Paris, France, J. Libbey, p. 191-203.
- Albergel J., Perez P., Vaksmann M., 1991. Amélioration des modèles de bilan hydrique sur parcelle par la prise en considération des états de surface. In : *Soil water balance in the Sudano-Sahelian zone*, M. V. K. Sivakumar, J.S. Wallace, C. Renard, C. Giroux éd., Wallingford, Grande-Bretagne, IAHS, p. 483-496.
- Chia E., Brossier J., Benoît M., 1992. Recherche-action : qualité de l'eau et changements des pratiques agricoles. *Economie rurale*, 208-209 p. 30-36. In : *Agriculture et qualité des eaux*, J.P. Deffontaines, M. Benoît, J. Brossier, E. Cha, F. Gras, M. Roux éd.
- Cortier B., 1994. Le diagnostic hydrique des cultures et la prévision des rendements en mil en zone sahélienne. In : *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale*, F.-N. Reyniers et L. Netoyo éd., Paris, France, J. Libbey, p. 349-362.
- Forest F., 1984. *Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Présentation et utilisation du logiciel BIP*. Montpellier, France, CIRAD, 63 p.
- Forest F., 1993. Zonage des risques de sécheresse en Afrique soudano-sahélienne et conséquences sur les systèmes de cultures. Rapport final projet STD3, CORAF-R3S, Montpellier, CIRAD, France 82 p.
- Fréteaud J.-P., Poss R. et Saragani H., 1987. Ajustement d'un modèle de bilan hydrique à des mesures tensio-neutroniques *in situ* sous culture de maïs. *Agron. Trop.* 42 (2) : 94-102.
- Le Houérou H.-N., 1992. Relations entre variabilité des précipitations et celle des productions primaire et secondaire en zone aride. In :

- L'aridité, une contrainte au développement*, Le Floch, M.Grouzis, A.Cornet, J-C.Bille éd., Paris, ORSTOM, p. 197-220
- Poss R., 1991. *Transferts de l'eau et des éléments minéraux dans les terres de barre du Togo. Conséquences agronomiques*. Thèse, Université Paris VI, Paris, France, 335 p.
- Reyniers F.N., Steinmetz S., Forest F., 1987. Impact de l'enracinement et de la réserve en eau utile sur la productivité du riz pluvial au Brésil. *In : Intensification de l'agriculture pluviale : relations entre la plante, le sol et l'eau*. Mémoires et travaux de l'IRAT, 13, CIRAD, Montpellier, France p. 65-74.
- Reyniers F.-N., 1994. Esquisse d'hydrosystème céréalier soudano-sahélien valorisant les précipitations. *In : Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique Tropicale*, F.-N. Reyniers et L. Netoyo éd., Paris, J. Libbey, p. 78-89.
- Scopel E., 1994. *Le semis direct avec paillis de résidus dans la région de V. Carranza au Mexique : intérêt de cette technique pour améliorer l'alimentation hydrique du maïs pluvial en zones à pluviométrie irrégulière*. Thèse, INA PG, Paris, France.
- Sebillotte M., 1978. Itinéraire technique et évolution de la pensée agronomique. *Acad. d'Agri. de France*, 64, p. 906-914.
- Seguy L., Bouzinac S., Kluthcouski J., 1989. Des modes de gestion mécanisés des sols et des cultures aux techniques de gestion en semis direct sans travail du sol appliqués aux *cerrados* du Centre-Ouest brésilien. Montpellier, France, CIRAD-CA, 156 p.
- Steinmetz S., Reyniers F.N., Forest F., 1988. Caracterização do regime pluviométrico e do balanço hídrico do arroz de sequeiro em distintas regiões produtoras do Brasil. Vol. 2, Catalogo basico de dados, EM-BRAPA, Brasília, Brésil, 278 p.

